
DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE PEQUEÑA ESCALA

Trabajo Fin de Grado

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Área de Ingeniería Eléctrica

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Escuela de Ingenierías Industriales



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Autor: Manuel Carmona Santiago

Tutor: José Antonio Aguado Sánchez

Cotutor: Ángel Paredes Parrilla

Málaga, 20 de junio de 2025

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como finalidad el diseño y desarrollo de un sistema de generación eléctrica mediante energía eólica, orientado a su uso en instalaciones domésticas o de pequeña escala. A través de este proyecto se pretende demostrar la viabilidad de aprovechar fuentes de energía renovable, concretamente el viento, como alternativa sostenible frente a los métodos convencionales de obtención de electricidad.

El sistema se basa en un aerogenerador de eje horizontal, diseñado y montado de forma personalizada, con componentes seleccionados por su disponibilidad, simplicidad y bajo coste. Se ha trabajado tanto en la estructura mecánica del conjunto como en la parte eléctrica, abarcando desde la captación de la energía cinética del viento hasta su transformación y almacenamiento en forma de energía eléctrica.

Durante el desarrollo del proyecto se han abordado distintas fases: el diseño del aerogenerador, la adaptación del generador eléctrico para mejorar su rendimiento, el diseño del circuito de conversión y almacenamiento de energía, así como la integración final de todos los componentes. El sistema ha sido puesto a prueba en un entorno controlado para observar su comportamiento ante distintas condiciones simuladas.

Este trabajo tiene además una intención didáctica y experimental, ya que no solo se ha buscado obtener un resultado funcional, sino también comprender y aplicar los principios físicos y técnicos que hacen posible la conversión de energía eólica en energía eléctrica.

En resumen, el proyecto contribuye al fomento de las energías limpias, evidenciando cómo soluciones relativamente simples pueden ofrecer resultados eficaces cuando se aplican conocimientos técnicos con creatividad y recursos accesibles. También sienta las bases para futuras mejoras y ampliaciones del sistema.

Palabras Clave

Batería, bobinas, campo electromagnético, controlador de carga, diodos, energías renovables, estructura, generación eléctrica, motor trifásico, palas, rectificador trifásico, regulador de tensión, señal, timón, turbina eólica, voltaje.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

ABSTRACT

This Final Degree Project aims to design and develop an electrical power generation system using wind energy, intended for use in domestic or small-scale installations. The purpose of this project is to demonstrate the feasibility of harnessing renewable energy sources, specifically wind, as a sustainable alternative to conventional electricity generation methods.

The system is based on a horizontal-axis wind turbine, custom-designed and assembled using components selected for their availability, simplicity, and low cost. Work has been carried out on both the mechanical structure and the electrical part of the system, covering the entire process from capturing the wind's kinetic energy to its conversion and storage as electrical energy.

Throughout the development of the project, several phases have been addressed: the design of the wind turbine, the adaptation of the electric generator to improve its performance, the design of the energy conversion and storage circuit, and the final integration of all components. The system has been tested in a controlled environment to observe its behaviour under different simulated conditions.

This project also serves a didactic and experimental purpose, as it not only aims to produce a functional result but also to understand and apply the physical and technical principles that make the conversion of wind energy into electrical energy possible.

In summary, the project contributes to the promotion of clean energy, showing how relatively simple solutions can yield effective results when technical knowledge is applied with creativity and accessible resources. It also lays the foundation for future improvements and system expansions.

Keywords

Battery, coils, electromagnetic field, charge controller, diodes, renewable energy, structure, electrical generation, three-phase motor, blades, three-phase rectifier, voltage regulator, signal, tail vane, wind turbine, voltage.

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1.	MOTIVACIÓN	11
1.2.	ANTECEDENTES.....	12
1.3.	OBJETIVOS Y ALCANCE.....	13
1.4.	FASES DEL PROYECTO.....	14
2.	FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA.....	16
2.1.	CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL VIENTO	16
2.2.	PARTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO	17
3.	ELECCIÓN DEL TIPO DE AEROGENERADOR.....	21
3.1.	COMPARATIVA DE MODELOS	21
3.2.	ELECCIÓN DEL NÚMERO DE PALAS	23
4.	FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR	26
4.1.	PRINCIPIOS FÍSICOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	27
4.2.	CONFIGURACIÓN DE FÁBRICA	29
4.3.	OPTIMIZACIÓN DEL GENERADOR	30
4.4.	INICIDENCIA DURANTE EL PROCESO DE MODIFICACIÓN	36
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
5.1.	SEÑAL CON CONFIGURACIÓN DE FÁBRICA	40
5.2.	SEÑAL TRAS LA MODIFICACIÓN DEL GENERADOR.....	42
5.3.	SEÑAL CON ANOMALÍA DURANTE EL PROCESO DE MODIFICACIÓN...	43
5.3.	SEÑAL USANDO PUENTE RECTIFICADOR	44
6.	IMPLEMENTACIÓN	46
6.1.	IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA.....	46
6.2.	DISEÑO Y MONTAJE DE LA ESTRUCTURA	48
6.3.	MONTAJE FINAL	53
7.	PRESUPUESTO.....	55
8.	POSIBLES MEJORAS	57
8.1.	SUSTITUCIÓN DE PALAS POR OTRAS DE MAYOR TAMAÑO	57

8.2.	INCLUSIÓN DE UN FILTRO DE CONDENSADORES.....	58
8.3.	AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA.....	59
8.4.	INCORPORACIÓN DE INVERSOR TRANSFORMADOR.....	60
8.5.	INCLUSIÓN DE UN ARRANCADOR AUTOMÁTICO	61
9.	CONCLUSIONES.....	63
10.	REFERENCIAS	64
	ANEXO I: PLANOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Motor síncrono trifásico de imanes permanentes utilizado. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	17
<i>Figura 2. Puente rectificador trifásico, diodos de 20A. Fuente: Elaboración Propia</i>	18
<i>Figura 3. Regulador de voltaje DC-DC de 400W. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	18
<i>Figura 4. Controlador de carga. Fuente: Temu (www temu.com)</i>	19
<i>Figura 5. Batería de plomo gel de 12 V y 12 Ah de capacidad. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	19
<i>Figura 6. Esquema General del Sistema. Fuente: Elaboración Propia</i>	20
<i>Figura 7. Aerogenerador HAWT o de eje horizontal. Fuente: Electrositio (www.electrositio.com).....</i>	21
<i>Figura 8. Aerogenerador Darrieus. Fuente: Electrositio (www.electrositio.com) ...</i>	22
<i>Figura 9. Aerogenerador Savonius. Fuente: Electrositio (www.electrositio.com) ..</i>	22
<i>Figura 10. Pack de 6 palas con buje. Fuente: Temu (www temu.com)</i>	24
<i>Figura 11. Motor síncrono trifásico utilizado. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	26
<i>Figura 12. Configuración de fábrica de las bobinas. Fuente: Elaboración Propia..</i>	29
<i>Figura 13. Objetivo final de la modificación. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	31
<i>Figura 14. Extracción del estator donde se encuentran las bobinas. Fuente: Elaboración Propia</i>	31
<i>Figura 15. Proceso de desestañado con el soldador. Fuente: Elaboración Propia</i>	32
<i>Figura 16. Terminales libres. Fuente: Elaboración Propia</i>	32
<i>Figura 17. Conexión en serie de la primera fase. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	33
<i>Figura 18. Empalmes aislados con silicona. Fuente: Elaboración Propia</i>	34
<i>Figura 19. Configuración final modificada. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	34
<i>Figura 20. Reposición del rotor junto al estator. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	35
<i>Figura 21. Impedancia de la fase A. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	37
<i>Figura 22. Impedancia de la fase B. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	38
<i>Figura 23. Impedancia de la fase C defectuosa. Fuente: Elaboración Propia</i>	38
<i>Figura 24. Señal generada entre dos fases por el motor sin modificar. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 200ms. Fuente: Elaboración Propia.....</i>	40
<i>Figura 25. Simulación de viento bajo o moderado de forma manual. Fuente: Elaboración Propia</i>	41
<i>Figura 26. Señal generada entre las dos fases del motor, tras su modificación, que se ven en la Figura 27. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 10ms, teniendo en cuenta que se ha utilizado la sonda. Fuente: Elaboración Propia</i>	42

<i>Figura 27. Simulación de viento extremo con el taladro. Fuente: Elaboración Propia</i>	43
<i>Figura 28. Señal trifásica generada por el motor modificado. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 5ms. Fuente: Elaboración Propia</i>	44
<i>Figura 29. Señal rectificadora obtenida. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 5ms. Fuente: Elaboración Propia</i>	45
<i>Figura 30. Simulación de viento extremo con el taladro tras la etapa de rectificación. Fuente: Elaboración Propia</i>	45
<i>Figura 31. Caja estanca donde se aloja el puente rectificador, el regulador de tensión DC-DC y el controlador de carga. Fuente: Elaboración Propia</i>	47
<i>Figura 32. Elaboración del soporte vertical. Fuente: Elaboración Propia</i>	49
<i>Figura 33. Soporte vertical terminado. Fuente: Elaboración Propia</i>	50
<i>Figura 34. Rodamiento con soporte utilizado. Fuente: Amazon (www.amazon.es)</i>	50
<i>Figura 35. Elaboración de la cola. Fuente: Elaboración Propia</i>	51
<i>Figura 36. Soporte horizontal terminado. Fuente: Elaboración Propia</i>	51
<i>Figura 37. Estructura completa montada, a falta de acoplar el generador con las palas. Fuente: Elaboración Propia</i>	52
<i>Figura 38. Implementación completa del aerogenerador. Fuente: Elaboración Propia</i>	54
<i>Figura 39. Palas de 90 cm. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	58
<i>Figura 40. Filtro DC de 10 A. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	59
<i>Figura 41. Batería de 300 Ah y 12.8 V. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)</i>	59
<i>Figura 42. Inversor transformador 12/230 V de 1500W. Fuente: Amazon (www.amazon.es)</i>	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

En un contexto global donde la transición energética y la sostenibilidad se han convertido en objetivos prioritarios, el desarrollo de soluciones accesibles para la generación de energía eléctrica renovable adquiere una relevancia creciente, tanto a nivel industrial como particular.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar soluciones energéticas sostenibles, eficientes y económicamente accesibles. Esta necesidad ha sido el punto de partida para el presente proyecto, que propone la construcción de un aerogenerador de pequeña escala utilizando materiales de bajo coste y componentes fácilmente disponibles en el mercado.

La motivación principal de este trabajo radica en demostrar que es posible diseñar y fabricar un sistema de generación eólica funcional sin grandes inversiones ni tecnologías sofisticadas. Mediante el uso de un motor de patinete eléctrico como generador, se plantea un enfoque práctico y realista para quienes desean iniciarse en el campo de las energías renovables o aplicar soluciones alternativas en entornos con recursos limitados.

Desde el punto de vista académico, este proyecto representa una oportunidad para consolidar conocimientos adquiridos durante la formación universitaria, especialmente en áreas como la conversión de energía, la electrónica de potencia y la integración de sistemas. Asimismo, promueve el aprendizaje autónomo, la innovación con medios simples y la aplicación de la ingeniería como herramienta para resolver problemas reales con impacto social y medioambiental.

1.2. ANTECEDENTES

En los últimos años, el interés por los sistemas de generación eólica a pequeña escala ha crecido significativamente, impulsado tanto por el desarrollo de tecnologías más accesibles como por el aumento de la conciencia ambiental.

Existen numerosos diseños de aerogeneradores domésticos, tanto comerciales como desarrollados por aficionados, que buscan generar energía para autoconsumo, fines educativos o experimentación.

Dentro de este ámbito, se han documentado múltiples proyectos que emplean materiales reciclados o reutilizados, entre ellos motores procedentes de electrodomésticos, bicicletas eléctricas o patinetes, como alternativa a los generadores convencionales. Estos enfoques permiten reducir costes y fomentar el aprendizaje técnico, aunque a menudo presentan limitaciones en cuanto a eficiencia, fiabilidad o facilidad de construcción.

Los aerogeneradores de eje horizontal, como el desarrollado en este proyecto, son los más comunes a pequeña escala por su sencillez y mayor aprovechamiento del viento. Sin embargo, muchos de los diseños disponibles requieren herramientas especializadas o conocimientos técnicos avanzados para su construcción, lo que dificulta su implementación en contextos domésticos o educativos.

En este contexto, el presente trabajo busca continuar la línea de proyectos de bajo coste y fácil replicación, aportando una propuesta práctica que aprovecha un motor trifásico síncrono de patinete eléctrico, junto con materiales fácilmente adquiribles en plataformas de bajo presupuesto. La idea es cubrir un vacío existente entre los modelos comerciales, generalmente caros, y los proyectos caseros poco documentados o de difícil montaje.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objeto principal de este proyecto es diseñar, construir y validar un prototipo funcional de aerogenerador de pequeña escala, utilizando un motor síncrono de imanes permanentes de patinete eléctrico de 350W y materiales de bajo coste, con el fin de demostrar la viabilidad técnica y práctica de sistemas de generación eólica accesibles.

Para alcanzar este fin, se plantean los siguientes objetivos:

- Investigar el funcionamiento básico de los aerogeneradores de eje horizontal y sus componentes principales.
- Seleccionar materiales y componentes asequibles, priorizando la reutilización y la disponibilidad en plataformas de bajo coste.
- Adaptar un motor trifásico de patinete eléctrico para su uso como generador en un sistema eólico.
- Construir una estructura metálica junto a un timón de cola que permita la correcta orientación del sistema frente al viento.
- Implementar un sistema de rectificación y regulación eléctrica que permita estabilizar la señal generada y almacenarla en una batería.
- Verificar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas experimentales, analizando parámetros como el voltaje generado, la estabilidad del sistema y su comportamiento en distintas condiciones de viento.

1.4. FASES DEL PROYECTO

Para garantizar un desarrollo ordenado y coherente del trabajo, el proyecto se ha estructurado en varias fases bien diferenciadas, que abarcan desde la investigación previa hasta la validación del prototipo final. A continuación, se detallan las principales etapas:

- **Fase 1. Investigación preliminar y revisión bibliográfica**

Se recopilaron conocimientos teóricos sobre generación eólica, funcionamiento de aerogeneradores de eje horizontal, principios electromagnéticos de los motores trifásicos y técnicas básicas de rectificación y almacenamiento de energía.

- **Fase 2. Definición de objetivos y alcance**

Se establecieron los objetivos principales del trabajo, delimitando claramente el alcance técnico y funcional del sistema a desarrollar, así como los recursos disponibles.

- **Fase 3. Selección de componentes y materiales**

Se evaluaron distintas opciones de motores, componentes electrónicos y materiales estructurales, priorizando soluciones de bajo coste, accesibles y fácilmente replicables. La mayoría de los elementos se adquirieron en plataformas de venta de bajo coste.

- **Fase 4. Modificación del motor y pruebas de laboratorio**

Se realizaron una serie de modificaciones al motor trifásico en el conexionado interno de sus bobinas para optimizar su rendimiento como generador. Además, se analizó la señal que se generaba el motor, tanto antes como después de modificar, con el osciloscopio.

- **Fase 5. Montaje eléctrico**

Se conectan todas las partes eléctricas del aerogenerador, integrando los diferentes módulos del sistema de conversión y carga.

- **Fase 6. Fabricación de la estructura**

Se diseñaron, fabricaron y ensamblaron las diferentes piezas que componen la estructura metálica del aerogenerador.

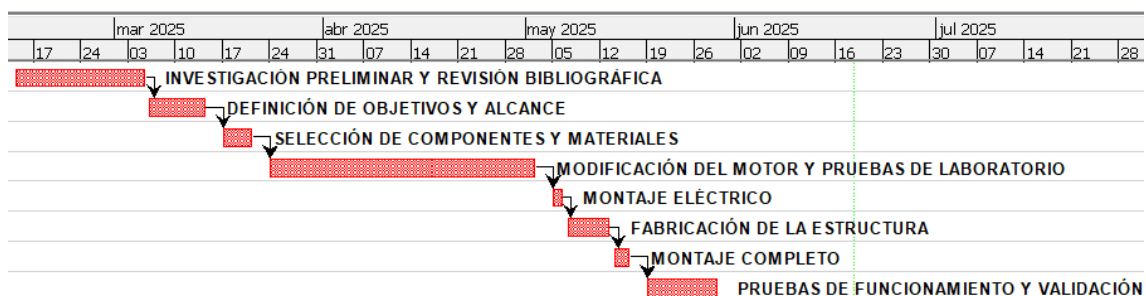
- **Fase 7. Montaje completo**

Se corresponde con la implementación completa del sistema, integrando todo el montaje eléctrico con la propia estructura.

- **Fase 8. Pruebas de funcionamiento y validación**

Se realizaron ensayos para verificar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de viento real, midiendo la tensión de salida, la capacidad de carga y la estabilidad del conjunto.

Diagrama de Gantt



2. FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA

2.1. CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA DEL VIENTO

La energía eólica es una forma de energía renovable que se obtiene a partir del aprovechamiento de la energía cinética presente en las masas de aire en movimiento. Esta energía es consecuencia directa de los efectos térmicos del Sol sobre la atmósfera terrestre, que generan diferencias de presión y temperatura, provocando desplazamientos de aire a distintas escalas.

Para poder aprovechar esta energía, se recurre al uso de aerogeneradores, dispositivos diseñados específicamente para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional. Este proceso comienza con las palas del rotor, que actúan como perfiles aerodinámicos: cuando el viento incide sobre ellas, se genera una fuerza de sustentación que provoca el giro del eje del rotor. Este eje, conectado a un generador eléctrico, permite transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

La potencia eólica disponible en un punto concreto depende directamente de tres factores principales: la densidad del aire, la velocidad del viento, y el área barrida por las palas del aerogenerador. La energía cinética capturada se puede estimar mediante la siguiente expresión de potencia [1]:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Donde:

- P_{viento} es la potencia disponible en el viento (W).
- ρ es la densidad del aire (kg/m^3).
- A es el área barrida por las palas del rotor (m^2).
- v es la velocidad del viento (m/s).

Sin embargo, no toda esta energía puede ser transformada en electricidad. El límite de Betz establece que el máximo aprovechamiento teórico de la energía eólica es del 59,3%.

En la práctica, los aerogeneradores comerciales logran rendimientos de entre el 35% y el 45%, debido a diversas pérdidas mecánicas, aerodinámicas y eléctricas [1].

El aprovechamiento eficiente del viento también depende de otros factores como la altura de instalación del generador, las condiciones topográficas del entorno y la orientación del rotor frente al viento. Es por ello que el diseño del sistema debe considerar tanto aspectos técnicos como ambientales, a fin de optimizar la captación energética en condiciones reales [2].

2.2. PARTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO

A continuación, se describe de forma general cada una de las etapas que lo componen y su función dentro del conjunto:

1. Generador

El sistema comienza con un motor trifásico síncrono de imanes permanentes de 350W, originalmente diseñado para su uso en patinetes eléctricos, que ha sido adaptado para funcionar como generador. Este componente convierte la energía mecánica del giro de las palas en energía eléctrica en forma de corriente alterna trifásica. Además, se ha modificado internamente la conexión de sus bobinas con el objetivo de aumentar el voltaje generado a bajas revoluciones.



Figura 1. Motor síncrono trifásico de imanes permanentes utilizado. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

2. Puente rectificador trifásico

La señal generada por el motor es alterna, por lo que debe ser rectificadas para poder ser utilizada o almacenada. Para ello se emplea un puente rectificador trifásico compuesto por diodos de 20 A, que transforma la corriente alterna en corriente rectificadas. Esta etapa es fundamental para permitir el posterior procesamiento de la energía eléctrica.



Figura 2. Puente rectificador trifásico, diodos de 20A. Fuente: Elaboración Propia

3. Regulador de voltaje DC-DC (Step-Up)

Una vez rectificadas, la señal pasa por un convertidor de tipo step-up (elevador de tensión) que tolera una potencia máxima de 400W. Esta etapa se encarga de aumentar ligeramente la tensión de salida del generador cuando esta no es suficiente por sí sola, especialmente en condiciones de viento bajo o moderado. De este modo, se asegura que se supere el umbral necesario para activar la siguiente etapa y cargar la batería con eficacia.



Figura 3. Regulador de voltaje DC-DC de 400W. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

4. Controlador de carga solar

A continuación, la corriente continua regulada es dirigida a un controlador de carga solar, un componente comúnmente utilizado en instalaciones fotovoltaicas, pero perfectamente adaptable a este contexto, ya que su función principal es regular la carga de la batería a partir de una fuente de corriente continua. En este caso, la salida del generador eólico es rectificadas y estabilizada, por lo que las condiciones eléctricas que recibe el controlador son similares a las de un panel solar, permitiendo su correcto funcionamiento. Su función es proteger la batería, controlar el flujo de carga y limitar la tensión máxima de salida a unos 14 V, valor apropiado para la carga segura de baterías de 12 V sin riesgo de sobrecarga. Admite una corriente máxima de 10 A y una tensión máxima de 50 V.



Figura 4. Controlador de carga. Fuente: Temu (www.temu.com)

5. Batería

Finalmente, la energía es almacenada en una batería de 12 V y 12 Ah de capacidad, lo que permite su uso posterior incluso cuando no haya viento disponible. Este componente actúa como reserva energética del sistema y estabiliza la tensión para posibles consumos posteriores.



Figura 5. Batería de plomo gel de 12 V y 12 Ah de capacidad. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

En la siguiente figura, se muestra de manera gráfica y simple cómo se estructura el proyecto a desarrollar.

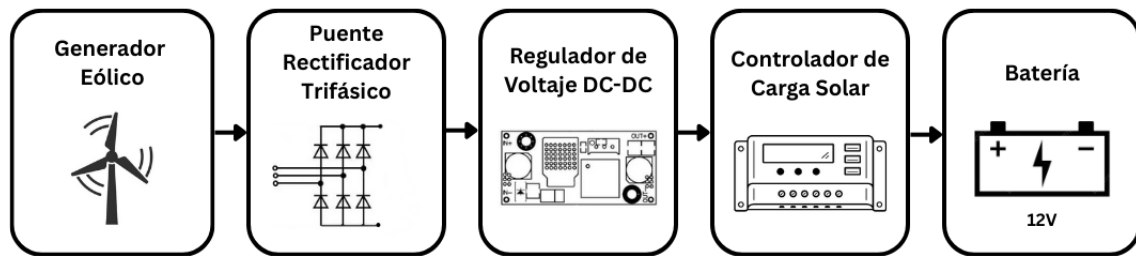


Figura 6. Esquema General del Sistema. Fuente: Elaboración Propia

3. ELECCIÓN DEL TIPO DE AEROGENERADOR

3.1. COMPARATIVA DE MODELOS

En este proyecto se ha optado por el desarrollo de un aerogenerador de eje horizontal (HAWT, *Horizontal Axis Wind Turbine*) frente a otras configuraciones posibles, como los de eje vertical (VAWT, *Vertical Axis Wind Turbine*). Esta decisión responde a un conjunto de factores técnicos, prácticos y de eficiencia que hacen de esta tipología la más adecuada para los objetivos del trabajo.

Los aerogeneradores de eje horizontal son ampliamente utilizados tanto en aplicaciones industriales como en instalaciones domésticas, debido a su alta eficiencia en la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica. Su diseño permite un mayor aprovechamiento de corrientes de aire con dirección relativamente constante, gracias a que las palas giran de forma perpendicular al flujo del viento, generando más potencia con menores velocidades relativas [3].



Figura 7. Aerogenerador HAWT o de eje horizontal. Fuente: Electrositio (www.electrositio.com)

En contraposición, los aerogeneradores de eje vertical, como los modelos Darrieus y Savonius, ofrecen ciertas ventajas interesantes. Entre ellas destacan la capacidad de captar el viento desde cualquier dirección sin necesidad de un sistema de

orientación, y su funcionamiento más silencioso y estable en entornos urbanos o con turbulencias. Además, su centro de gravedad más bajo permite una mejor distribución del peso si se instalan a ras de suelo.



Figura 8. Aerogenerador Darrieus. Fuente: Electrositio (www.electrositio.com)



Figura 9. Aerogenerador Savonius. Fuente: Electrositio (www.electrositio.com)

Sin embargo, estas ventajas se ven contrarrestadas por una eficiencia energética generalmente inferior respecto a los de eje horizontal, especialmente en aplicaciones donde el viento tiene una dirección dominante y el espacio para instalación no es una limitación importante. Además, su construcción suele requerir geometrías más complejas, materiales específicos y un diseño más especializado, lo que dificulta su fabricación con componentes de bajo coste y reutilizados, tal como se ha planteado en este trabajo [3].

Otro punto importante es la posibilidad de reutilizar un motor trifásico como generador. En un diseño de eje horizontal, el acoplamiento directo del eje del motor al sistema de palas es más sencillo y eficiente. En cambio, en configuraciones verticales, el sistema de transmisión o el eje del generador suelen estar sometidos a más esfuerzo o requieren una disposición diferente, menos compatible con componentes comerciales ya existentes.

Por estas razones, se consideró que el aerogenerador de eje horizontal ofrecía un mejor equilibrio entre rendimiento, simplicidad constructiva, compatibilidad con los materiales disponibles y capacidad de replicación del prototipo, todo ello sin comprometer la funcionalidad del sistema en escenarios de viento reales.

3.2. ELECCIÓN DEL NÚMERO DE PALAS

En el diseño del aerogenerador se optó por incorporar un rotor de seis palas, respondiendo así a criterios tanto técnicos como prácticos, alineados con los objetivos fundamentales del proyecto: funcionalidad con bajo coste, sencillez de montaje y capacidad de operar en entornos de viento bajo o moderado.

Consideraciones técnicas

Desde el punto de vista aerodinámico, el número de palas influye directamente en el comportamiento del rotor. Un mayor número de palas implica un aumento del par generado, aunque a costa de reducir la velocidad angular y disminuir la eficiencia aerodinámica total en comparación con modelos de tres palas, que son típicos en aplicaciones comerciales por su buen rendimiento a altas velocidades de viento [4].

Sin embargo, para este proyecto, la prioridad no era maximizar eficiencia en entornos ideales, sino permitir la puesta en marcha del generador a bajas velocidades de viento, con el fin de obtener voltajes útiles incluso cuando las

condiciones no son óptimas. En este sentido, un rotor con más palas se comporta mejor, ya que capta mayor energía desde el arranque y mantiene el giro del generador con menor esfuerzo mecánico.

Disponibilidad y coste de componentes

En cuanto al aspecto práctico, las palas utilizadas en este prototipo tienen una longitud de 63 cm y fueron adquiridas en Temu, una plataforma destacada por ofrecer componentes a bajo coste. La elección de este modelo concreto respondió a su compatibilidad con el buje seleccionado, su precio asequible y la posibilidad de recibirlas sin necesidad de procesos de fabricación propios o recursos avanzados.

Aunque no se trata de palas diseñadas a medida para este generador, su forma, tamaño y rigidez han demostrado ser adecuadas para los fines del proyecto, ofreciendo un buen equilibrio entre simplicidad de montaje, resistencia mecánica y captación de energía. Además, su tamaño es ideal para mantener el generador en un rango de revoluciones adecuado para su posterior transformación eléctrica, sin exceder las capacidades mecánicas del sistema.

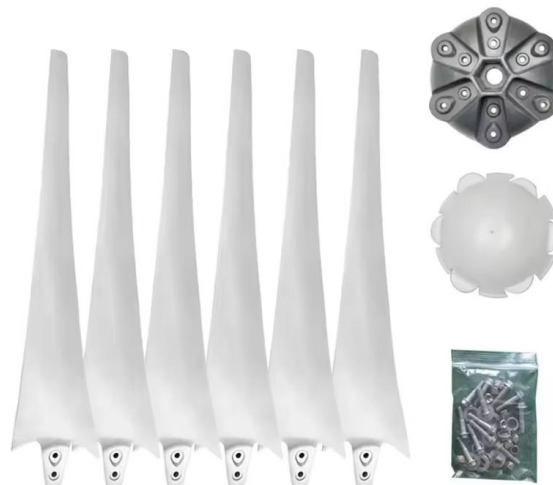


Figura 10. Pack de 6 palas con buje. Fuente: Temu (www.temu.com)

Por tanto, la configuración de seis palas de 63 cm se justifica tanto por criterios técnicos, relacionados con la necesidad de generar par en condiciones de viento reducidas, como por criterios económicos y logísticos, al tratarse de un componente fácilmente accesible, sin necesidad de fabricación, y perfectamente integrado en el enfoque low-cost del proyecto.

4. FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR

El sistema generador de este proyecto se basa en un motor trifásico síncrono de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés), originalmente diseñado para operar como motor de tracción de 350W, pero adaptado aquí para operar en modo generador. Su funcionamiento se sustenta en los principios del electromagnetismo clásico, particularmente en la Ley de Faraday-Lenz y en las interacciones entre campos magnéticos y conductores.



Figura 11. Motor síncrono trifásico utilizado. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

4.1. PRINCIPIOS FÍSICOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

En un generador de este tipo, el rotor está compuesto por imanes permanentes de neodimio dispuestos alternadamente con polaridad norte-sur a lo largo del perímetro interior del tambor giratorio. Este tambor es la parte externa del motor, que en esta aplicación gira gracias al empuje aerodinámico generado por las palas del aerogenerador. Estos imanes crean un campo magnético rotativo respecto al estator.

El estator, por su parte, está fijo y situado en el centro del motor. En él se alojan las bobinas distribuidas en tres fases (A, B y C), con cinco bobinas en paralelo por fase en la configuración original. Las bobinas están fabricadas con hilo de cobre esmaltado, que actúa como conductor enrollado en forma de espiras.

Cuando los imanes del rotor giran alrededor del estator, el flujo magnético que atraviesa cada bobina varía con el tiempo. Esta variación temporal del flujo magnético (ϕ) a través de las espiras del conductor induce una fuerza electromotriz (ε) según la Ley de Faraday-Lenz [4]:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Donde:

- ε es la fuerza electromotriz inducida en la bobina.
- N es el número de espiras de la bobina.
- Φ es el flujo magnético instantáneo que atraviesa cada espira.
- $\frac{d\phi}{dt}$ es la variación del flujo magnético con respecto al tiempo.

El signo negativo refleja la Ley de Lenz, que indica que la corriente inducida genera un campo que se opone a la variación del flujo que la produce [4].

El flujo magnético que atraviesa una bobina es función de la densidad de campo magnético B generada por los imanes, del área efectiva de la bobina A , y del ángulo relativo entre ambos:

$$\phi(t) = B \cdot A \cdot \cos(\omega t)$$

Por tanto, la tensión generada debe tener forma senoidal y está directamente relacionada con:

- La velocidad angular ω del rotor.
- La intensidad del campo magnético B .
- La geometría y número de espiras de las bobinas.

La frecuencia de la señal inducida por fase viene dada por [5]:

$$f = \frac{p \cdot n}{120}$$

Siendo:

- f es la frecuencia de la señal generada (Hz).
- p es el número total de polos magnéticos del generador (27 en este caso).
- n es la velocidad de giro del rotor (rpm).

Por lo tanto, la frecuencia de la señal que se produzca irá en función de la velocidad de giro del propio generador. Aunque cabe destacar que, en este tipo de aplicación no reviste una especial relevancia. Esto se debe a que la señal trifásica generada no se utiliza directamente en corriente alterna, sino que es rectificadora posteriormente mediante un puente de diodos.

Por tanto, aunque se puedan observar variaciones significativas de frecuencia durante las pruebas (especialmente con el uso del taladro o al accionar el rotor manualmente), estas oscilaciones no afectan al funcionamiento final del sistema, cuyo objetivo es alimentar una batería de 12 V en corriente continua, a través de las etapas de regulación y control de carga.

En conclusión, la estructura física y magnética del generador, junto con la dinámica de rotación proporcionada por el viento, da lugar a la conversión de energía cinética eólica en energía eléctrica alterna trifásica, que será posteriormente rectificada y regulada por las etapas siguientes del sistema.

4.2. CONFIGURACIÓN DE FÁBRICA

En su estado original, el motor contaba con una configuración en estrella, donde cinco bobinas estaban conectadas en paralelo por fase. Esta configuración está pensada para maximizar la entrega de corriente cuando el motor opera como tal, a costa de una menor tensión, lo que es adecuado en aplicaciones como la tracción eléctrica de patinetes.

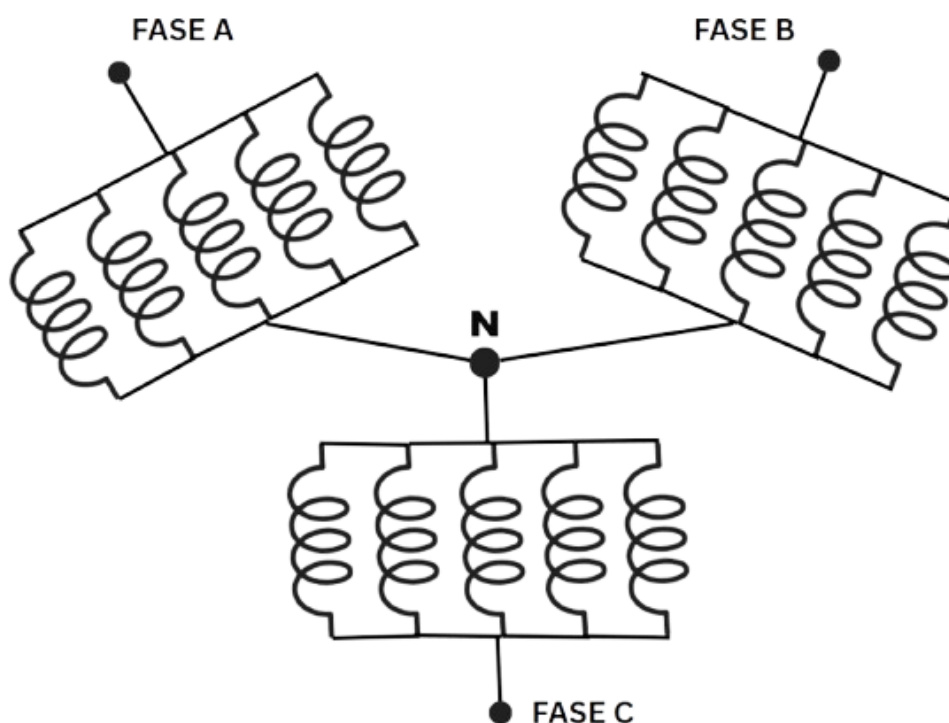


Figura 12. Configuración de fábrica de las bobinas. Fuente: Elaboración Propia

Al utilizar el motor como generador sin modificar su estructura interna, se realizaron diversas pruebas experimentales en laboratorio para analizar su comportamiento eléctrico. En un primer caso, se empleó un taladro eléctrico como fuente de arrastre para simular un escenario de viento extremo, forzando el giro del eje a altas revoluciones. Bajo estas condiciones, se registró mediante osciloscopio, midiendo entre dos fases, una señal alterna con un valor pico de aproximadamente 9 V, como se observa en la *Figura 24*.

Sin embargo, debido a las limitaciones del taladro, no fue posible simular condiciones de viento bajo o moderado con precisión, ya que el dispositivo no

ofrecía un funcionamiento a bajas velocidades. Para suplir esta carencia, se recurrió a un accionamiento manual del eje con la mano, lo que permitió simular, de forma aproximada, un escenario de viento realista en entornos no extremos. En este caso, el voltaje generado apenas alcanzó los 4 V de pico, lo que resultó insuficiente para activar el regulador de tensión DC-DC encargado de elevar la tensión de salida del sistema, cuyo umbral mínimo de tensión es 6 V.

Estas limitaciones evidenciaron la baja eficiencia del generador en su configuración original para su uso en aplicaciones eólicas, especialmente en condiciones reales donde el viento no alcanza altas velocidades de forma constante. Este análisis justificó la necesidad de modificar el conexionado interno de las bobinas, tal como se detalla en el siguiente *apartado 4.3. OPTIMIZACIÓN DEL GENERADOR.*

4.3. OPTIMIZACIÓN DEL GENERADOR

Con el fin de mejorar el rendimiento del aerogenerador a bajas revoluciones, se llevó a cabo una modificación en la configuración interna del motor trifásico de imanes permanentes utilizado como generador.

De fábrica, este motor presentaba una conexión en estrella, en la que cada fase estaba formada por un conjunto de cinco bobinas conectadas en paralelo. Como se ha podido observar en el apartado anterior, esta disposición permite una mayor entrega de corriente, pero limita considerablemente el voltaje generado cuando la velocidad de giro es reducida, como ocurre bajo condiciones de viento bajo o moderado.

Para solventar este inconveniente, se optó por reconfigurar cada fase en serie, de forma que la tensión generada por cada bobina se suma, aumentando así el voltaje de salida total. Este enfoque permite que, incluso a velocidades angulares bajas, se genere una tensión suficiente para activar el regulador de voltaje DC-DC y, en consecuencia, alimentar en su conjunto el sistema de carga.

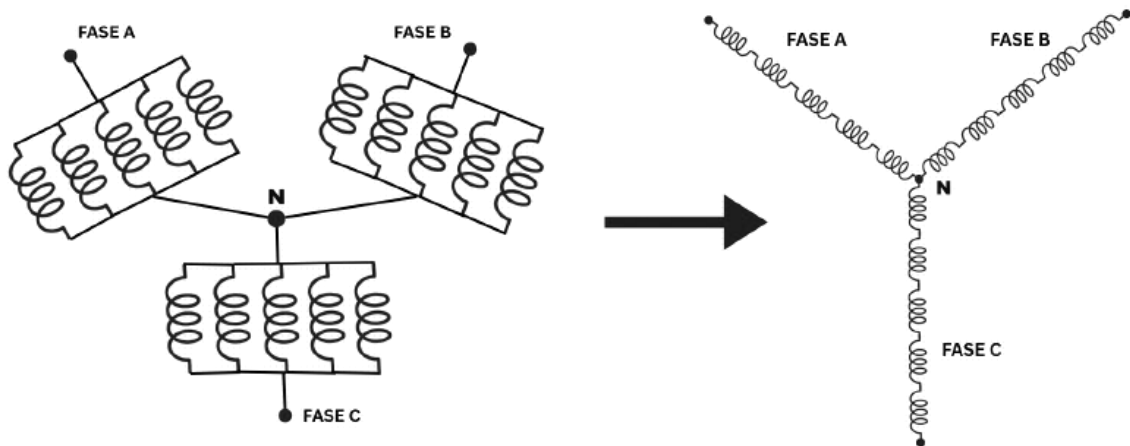


Figura 13. Objetivo final de la modificación. Fuente: Elaboración Propia

Proceso de modificación

La modificación interna del motor se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

1. Extracción del estator:

Para acceder cómodamente a los bobinados y trabajar con mayor limpieza y precisión, se procedió a desmontar el motor y extraer el estator. Esto permitió trabajar con el estator sin interferencias del campo magnético de los imanes permanentes situados en el rotor.

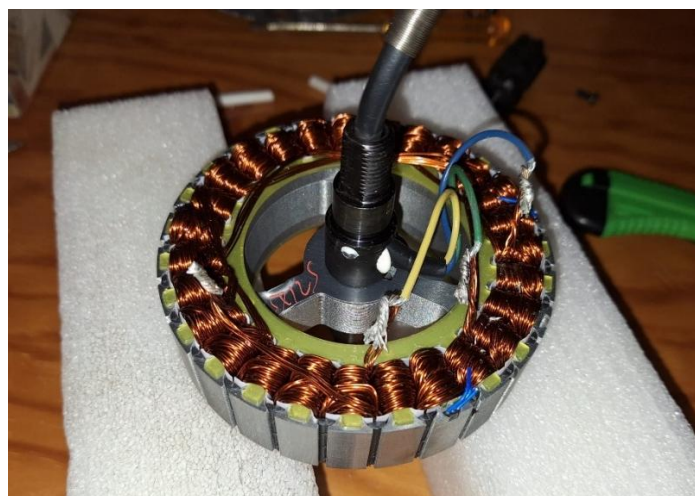


Figura 14. Extracción del estator donde se encuentran las bobinas. Fuente: Elaboración Propia

2. Desestañado de las conexiones originales:

Una vez expuestas las conexiones internas, se eliminaron cuidadosamente los puntos de soldadura que unían las bobinas en paralelo dentro de cada fase, y cada fase con los cables externos. Este paso fue fundamental para liberar completamente cada extremo de bobina y prepararlo para la nueva configuración.



Figura 15. Proceso de desestañado con el soldador. Fuente: Elaboración Propia

3. Identificación de terminales:

Con todas las bobinas accesibles, se utilizó un polímetro en modo de prueba de continuidad para identificar con precisión los pares de extremos correspondientes a cada bobina. Esta comprobación permitió asegurarse de que cada empalme se realizara correctamente, sin errores de conexión.



Figura 16. Terminales libres. Fuente: Elaboración Propia

4. Reconexión en serie:

Una vez identificadas las bobinas, se procedió a unir las bobinas en serie dentro de cada fase, soldando los extremos adecuados de manera secuencial. Se aplicó esta misma operación para las tres fases del motor.

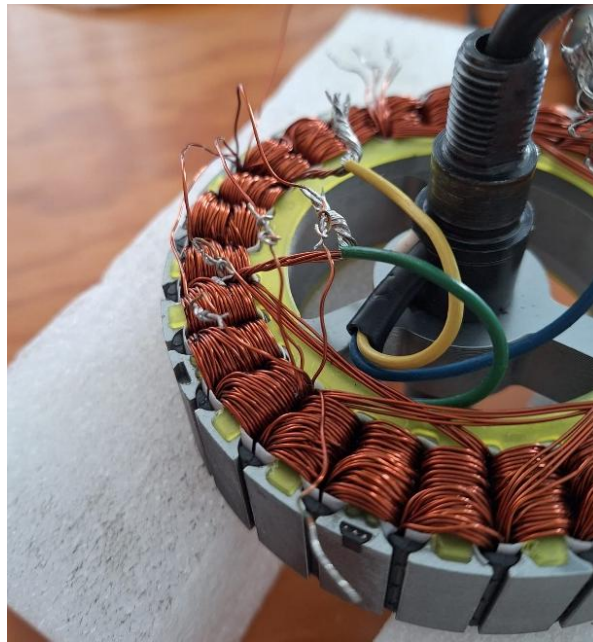


Figura 17. Conexión en serie de la primera fase. Fuente: Elaboración Propia

5. Aislamiento en las conexiones:

Cada conexión nueva realizada fue convenientemente aislada con silicona, la cual es un material con excelentes propiedades aislantes tanto eléctricas como térmicas. De esta manera, se evitan cortocircuitos y se asegura una buena protección eléctrica y mecánica a lo largo del tiempo. En la *Figura 18*, se observan las distintas conexiones nuevas, quedando libres solamente los terminales finales de cada una de las tres fases.



Figura 18. Empalmes aislados con silicona. Fuente: Elaboración Propia

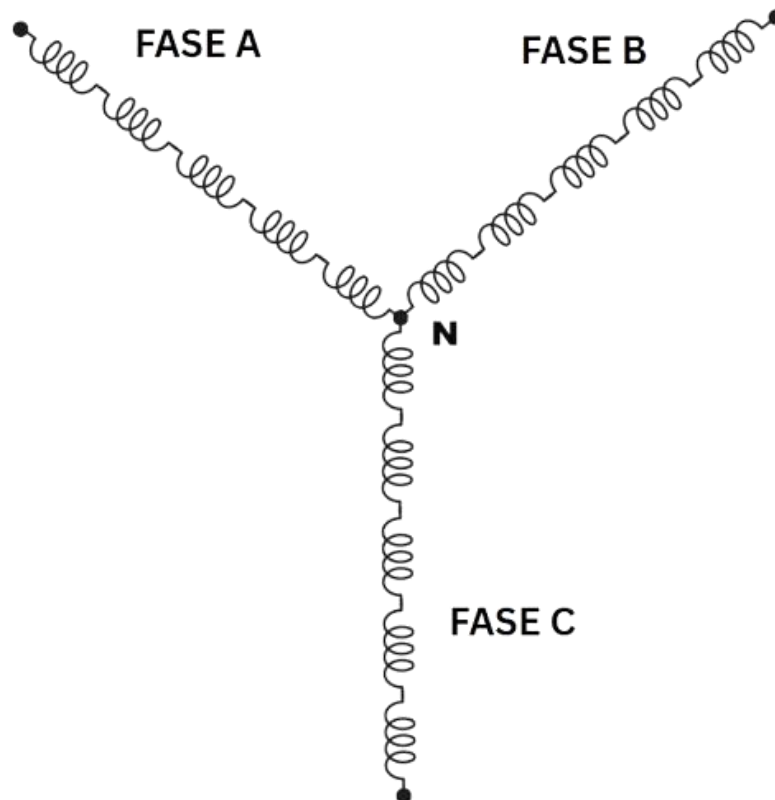


Figura 19. Configuración final modificada. Fuente: Elaboración Propia

6. Verificación:

Tras completar la modificación, se midió la impedancia total de cada fase con el polímetro. Los valores obtenidos fueron coherentes con la nueva configuración: alrededor de 3,8 ohmios en las dos fases correctas, y 3,5 ohmios en una fase con una ligera anomalía de fábrica, la cual ha sido tratada y documentada por separado en el siguiente apartado 4.4. *INICIDENCIA DURANTE EL PROCESO DE MODIFICACIÓN.*

7. Montaje y pruebas:

Una vez finalizada la modificación y verificada la impedancia de cada fase, se procedió al reensamblaje del motor, colocando nuevamente el estator en su posición y asegurando la carcasa.

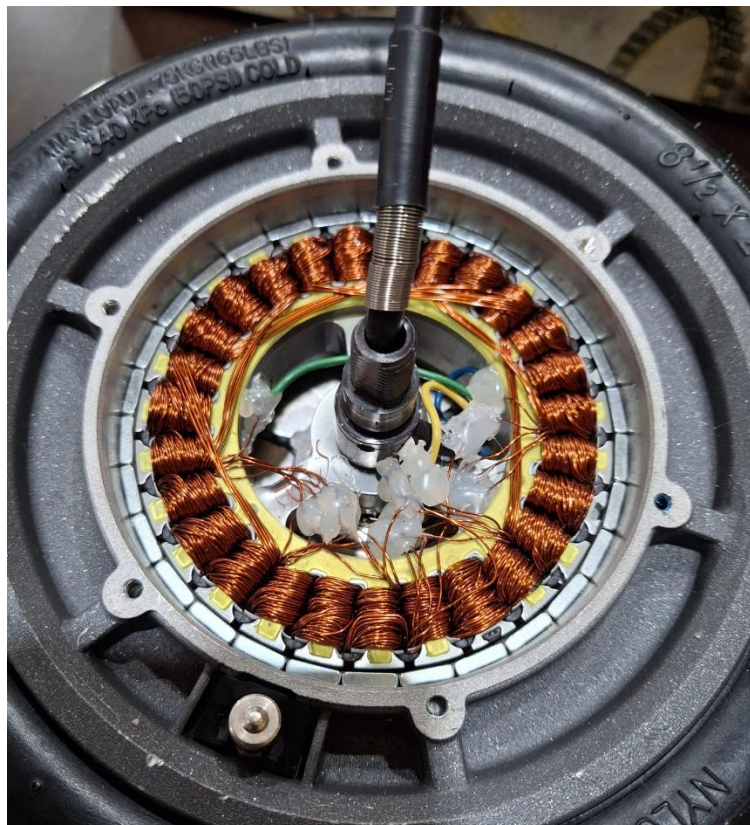


Figura 20. Reposición del rotor junto al estator. Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente, se volvió a llevar al laboratorio para llevar a cabo una serie de pruebas experimentales, utilizando un osciloscopio para el análisis de la señal de salida.

Para simular condiciones de viento extremo, se utilizó de nuevo un taladro eléctrico acoplado al eje del motor, permitiendo hacerlo girar a altas revoluciones. En esta situación se registraron señales alternas trifásicas con picos de tensión de entre 38 y 40 V, valores significativamente más altos que los obtenidos con la configuración original del motor, aproximadamente casi 5 veces mayor.

En la *Figura 26*, se aprecia la señal generada entre dos fases, donde se ha utilizado la sonda del osciloscopio, es decir, los valores de tensión de la señal los divide entre diez.

Por otro lado, se realizaron pruebas simulando condiciones más realistas de funcionamiento, como el viento bajo o moderado, aplicando un movimiento manual con la mano sobre el propio motor. En este caso, la tensión generada alcanzó los 11 o 12 V, suficientes para activar el regulador de voltaje DC-DC, que requiere un umbral mínimo de tensión de 6 V para iniciar su funcionamiento.

Esta mejora permite al sistema comenzar el proceso de carga de la batería incluso en condiciones no ideales de viento, ampliando la funcionalidad del aerogenerador y validando la eficacia de la modificación realizada.

Este cambio en la arquitectura interna del generador ha permitido adaptar un componente originalmente diseñado para tracción eléctrica a un entorno de generación eólica, optimizando su funcionamiento en un rango más amplio de condiciones reales de uso.

4.4. INCIDENCIA DURANTE EL PROCESO DE MODIFICACIÓN

Durante el proceso de reconexión de las bobinas del motor trifásico en configuración serie, se detectó una anomalía de fábrica en una de las fases cuando se estaba identificando los pares de extremos correspondientes a cada bobina mediante el polímetro. Concretamente, se observó que dos de las bobinas de esa fase presentaban un contacto eléctrico no deseado, lo que indicaba una posible falta de aislamiento entre sus devanados. Este tipo de defecto puede generar dudas sobre la integridad de la fase, ya que las bobinas deben estar eléctricamente aisladas entre sí, salvo en los puntos de empalme previstos.

Diseño y Prototipado de un Aerogenerador de Pequeña Escala

Para analizar la magnitud del problema, se realizó una medición de la impedancia total de cada fase, una vez hecho el conexionado en serie de las bobinas, utilizando un multímetro digital de sobremesa. Las dos fases sin defectos presentaron una impedancia de 3,8 ohmios, mientras que la fase afectada arrojó un valor de 3,5 ohmios.

Esta pequeña diferencia sugiere que, aunque existe una conexión interna no prevista, su efecto es limitado y no implica un cortocircuito severo ni una pérdida significativa de energía.

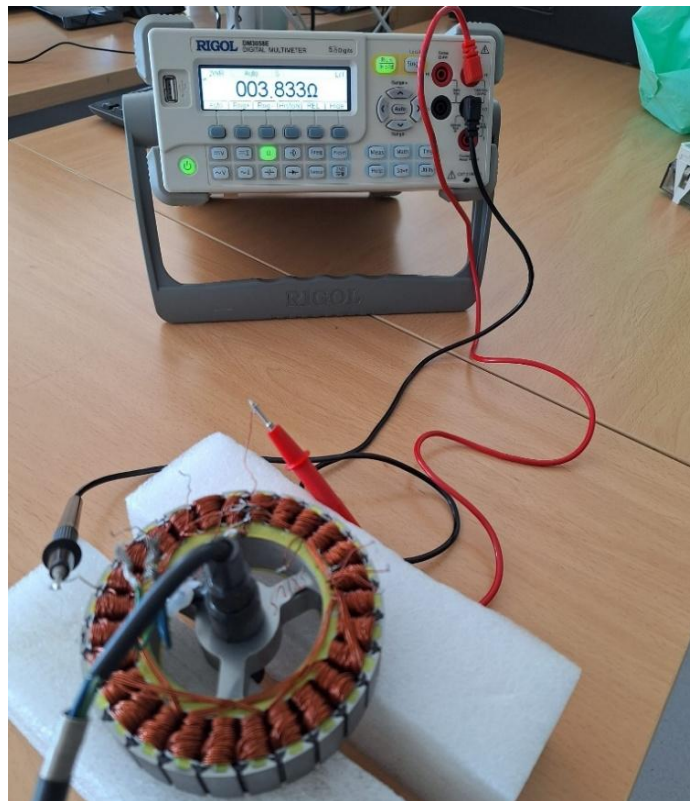


Figura 21. Impedancia de la fase A. Fuente: Elaboración Propia

Diseño y Prototipado de un Aerogenerador de Pequeña Escala

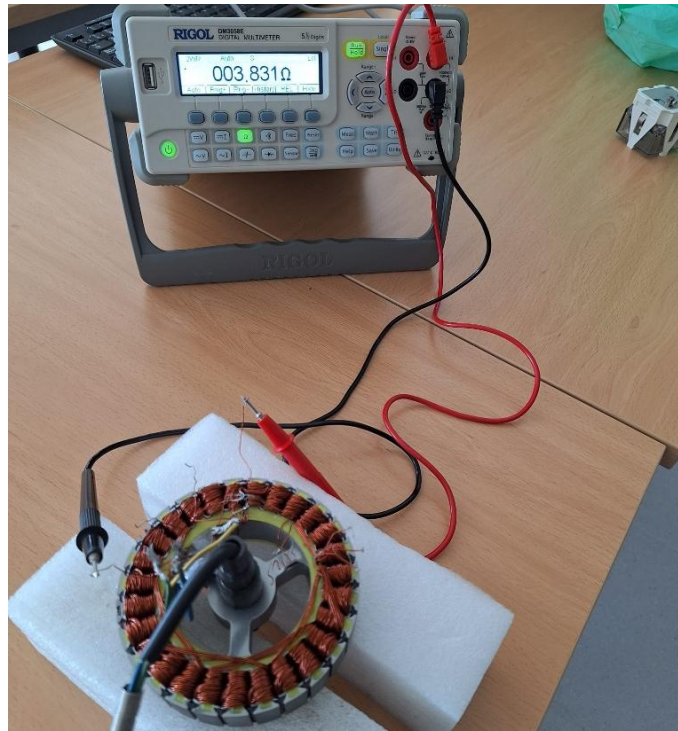


Figura 22. Impedancia de la fase B. Fuente: Elaboración Propia

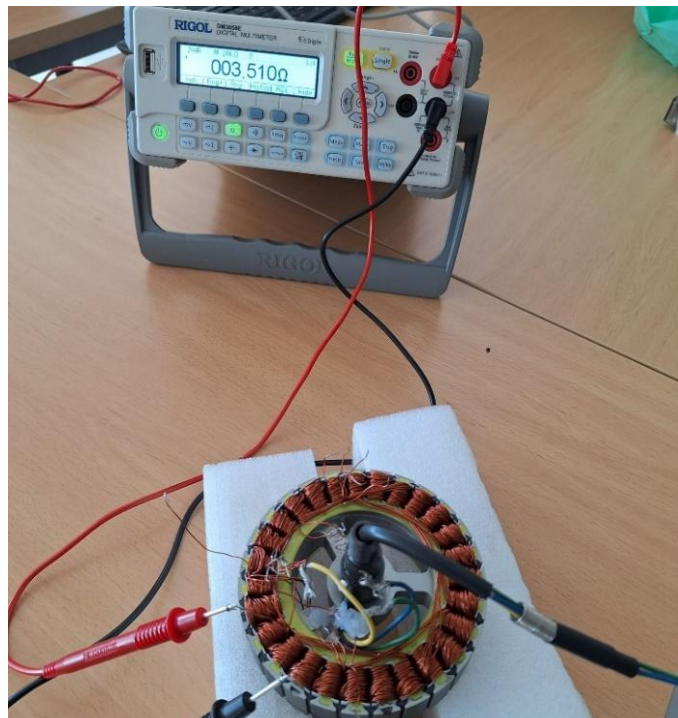


Figura 23. Impedancia de la fase C defectuosa. Fuente: Elaboración Propia

Una vez reensamblado el motor y sometido a pruebas con el osciloscopio en el laboratorio, se comprobó que, en la señal trifásica resultante, la fase afectada mostraba diferencias en la forma de la onda generada.

En la *Figura 28*, se aprecia la señal trifásica, medida con el osciloscopio, que genera el motor modificado, donde se observa como la fase de color azul presenta dicha anomalía.

Esta irregularidad, aunque perceptible, no representa una limitación significativa, ya que la señal generada se somete a continuación a un proceso de rectificación mediante un puente de diodos trifásico, seguido por un regulador de voltaje DC-DC y, finalmente, un controlador de carga que estabiliza la salida.

Este proceso de conversión a corriente rectificada corrige de forma efectiva la mayoría de las irregularidades presentes en la señal alterna, por lo que la inestabilidad inicial no afecta de forma relevante al rendimiento global del sistema.

A pesar de la pequeña incidencia, se concluyó que el generador modificado cumple su función de forma robusta y fiable dentro del diseño planteado.

Este caso resalta la importancia de revisar el estado interno de componentes reutilizados, especialmente cuando no han sido diseñados para funciones generadoras. No obstante, en este proyecto, la solución adoptada fue válida, permitiendo mantener la funcionalidad sin comprometer la eficiencia del sistema final.

Por tanto, podemos concluir que, la incidencia detectada en una de las fases no ha supuesto una limitación relevante para el funcionamiento del generador. Aunque se observó una leve inestabilidad en la señal, el diseño del sistema completo, que incluye rectificación y regulación, permite compensar estas irregularidades. El resultado final es un generador funcional y adecuado para el propósito del proyecto, demostrando que, con un control básico de calidad y una verificación técnica adecuada, es posible integrar componentes no convencionales sin comprometer el rendimiento global.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este apartado tiene como finalidad complementar el apartado anterior mediante la presentación y análisis de los resultados experimentales obtenidos con el osciloscopio en el laboratorio. Mientras que en dicho apartado se explicaban las configuraciones internas del generador y las modificaciones realizadas, aquí se exponen de forma clara y visual las señales reales captadas en distintas pruebas de funcionamiento. También se incluyen los resultados tras el proceso de rectificación, así como el análisis de una señal afectada por una anomalía en una de las fases detectada durante la modificación.

Estas señales permiten visualizar el comportamiento del generador bajo distintas condiciones de giro, y evidencian el impacto real de la modificación aplicada, tanto en términos de amplitud como de utilidad de la energía generada.

5.1. SEÑAL CON CONFIGURACIÓN DE FÁBRICA

En esta prueba se analizó la señal generada por el generador tal como venía de fábrica, con las bobinas conectadas en paralelo en cada fase (como se explicó en el apartado 4.2. CONFIGURACIÓN DE FÁBRICA). Se forzó el giro del rotor con un taladro para simular viento fuerte, obteniendo una señal alterna con un valor pico de aproximadamente 9 V.

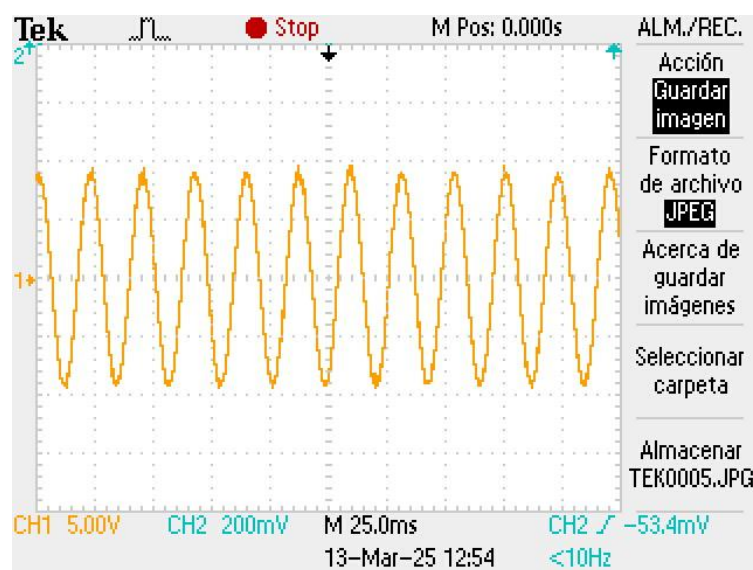


Figura 24. Señal generada entre dos fases por el motor sin modificar. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 200ms. Fuente: Elaboración Propia

Al intentar simular un viento de intensidad baja o moderada, como el taladro no permitía funcionar a velocidades suficientemente bajas, se optó por hacer girar el rotor manualmente, con lo cual se obtuvo una señal de unos 5 V pico, insuficiente para alimentar el sistema eléctrico posterior.

Estas señales fueron ya comentadas anteriormente, pero aquí se insertan las capturas reales tomadas en el laboratorio.

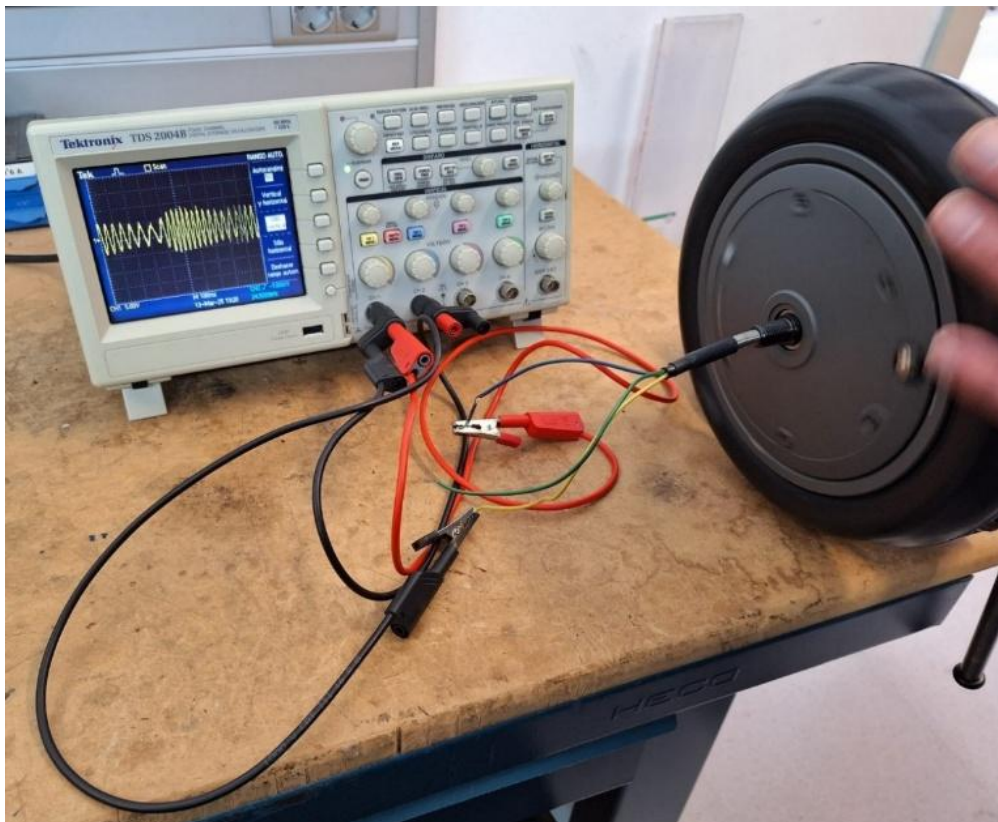


Figura 25. Simulación de viento bajo o moderado de forma manual. Fuente: Elaboración Propia

5.2. SEÑAL TRAS LA MODIFICACIÓN DEL GENERADOR

Después de llevar a cabo la modificación interna del generador, que consistió en reconectar las bobinas de cada fase en serie en lugar de en paralelo (como ya se ha comentado en el apartado 4.3. *OPTIMIZACIÓN DEL GENERADOR*), se repitieron las pruebas de generación eléctrica en laboratorio.

Utilizando el taladro para simular un viento fuerte, se observó un incremento notable en la amplitud de la señal generada, alcanzando valores pico de entre 38 y 40 voltios por fase. Este aumento es consecuencia directa de haber elevado la impedancia total de cada fase, lo que permite una mayor diferencia de potencial inducida por la variación del flujo magnético, tal como dicta la Ley de Faraday [4].

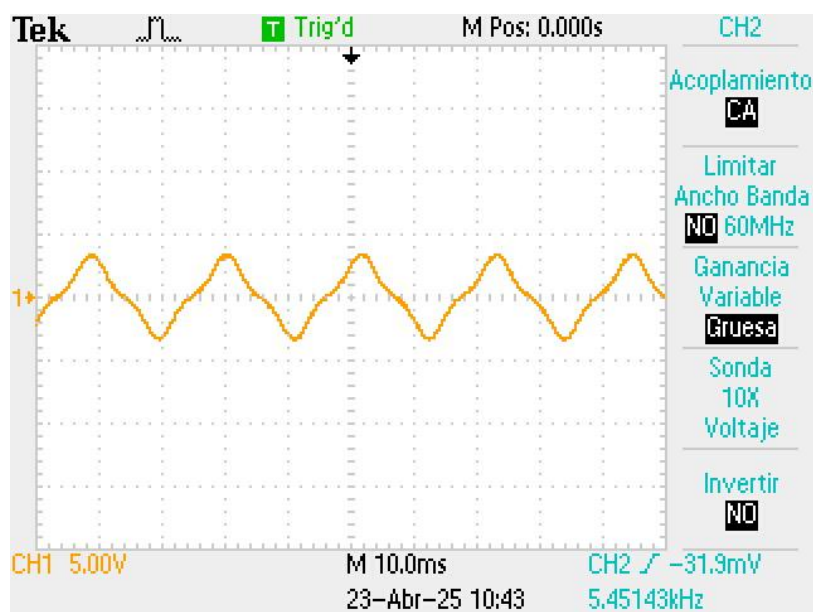


Figura 26. Señal generada entre las dos fases del motor, tras su modificación, que se ven en la Figura 27. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 10ms, teniendo en cuenta que se ha utilizado la sonda. Fuente: Elaboración Propia

Cuando se simuló un viento moderado haciendo girar el generador manualmente, se alcanzaron valores de 11 a 12 V pico, muy superiores a los obtenidos con la configuración original. Este valor ya es suficiente para alimentar el regulador DC-DC, que requiere un umbral mínimo de tensión de entrada para operar correctamente.



Figura 27. Simulación de viento extremo con el taladro. Fuente: Elaboración Propia

5.3. SEÑAL CON ANOMALÍA DURANTE EL PROCESO DE MODIFICACIÓN

Durante la modificación interna del generador (ver apartado 4.4. *INCIDENCIA DURANTE EL PROCESO DE MODIFICACIÓN*), se identificó una anomalía en una de las fases, en la que dos bobinas hacían contacto entre sí debido a un defecto de aislamiento. Aunque este contacto parecía producirse en el extremo final del bobinado, por lo que, se decidió mantener la fase conectada en serie, tras comprobar que su impedancia ($3,5 \Omega$) era razonablemente próxima a la de las otras fases ($3,8 \Omega$).

En el osciloscopio se observó una ligera distorsión en la señal de dicha fase. No obstante, este tipo de irregularidad no afecta de forma significativa al funcionamiento global del sistema, ya que la señal es rectificadora en la siguiente etapa.

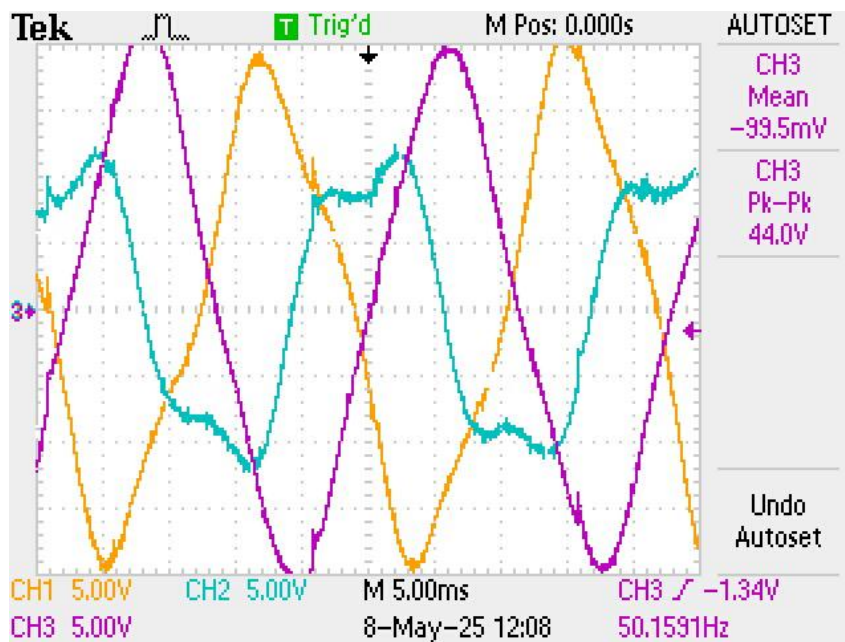


Figura 28. Señal trifásica generada por el motor modificado. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 5ms. Fuente: Elaboración Propia

5.3. SEÑAL USANDO PUENTE RECTIFICADOR

Una vez modificada la conexión de las bobinas y confirmado el aumento del voltaje en la señal trifásica generada, se procedió a comprobar la salida después de la etapa de rectificación. Para ello, se conectó el generador al puente rectificador trifásico de diodos, y se realizó una nueva medición utilizando nuevamente el taladro como fuente de rotación a altas revoluciones, simulando un escenario de viento intenso.

La señal obtenida en el osciloscopio corresponde a una señal rectificadora con un nivel significativo de rizado, teniendo en cuenta la anomalía nombrada anteriormente, y que no se emplean condensadores de filtrado. A pesar de ello, esta forma de onda es perfectamente válida para alimentar el regulador de tensión DC-DC y, en consecuencia, cargar la batería. El valor eficaz de tensión de la señal superó con solvencia los 14 V necesarios para cargar la batería, concretamente 25,5 V, demostrando que el sistema es funcional bajo condiciones de viento elevadas.

Aunque en una instalación definitiva se recomienda añadir una etapa de filtrado para suavizar aún más la señal, para fines de este proyecto experimental y dadas

las características del regulador y el controlador de carga empleados, la señal obtenida cumple con los requerimientos eléctricos.

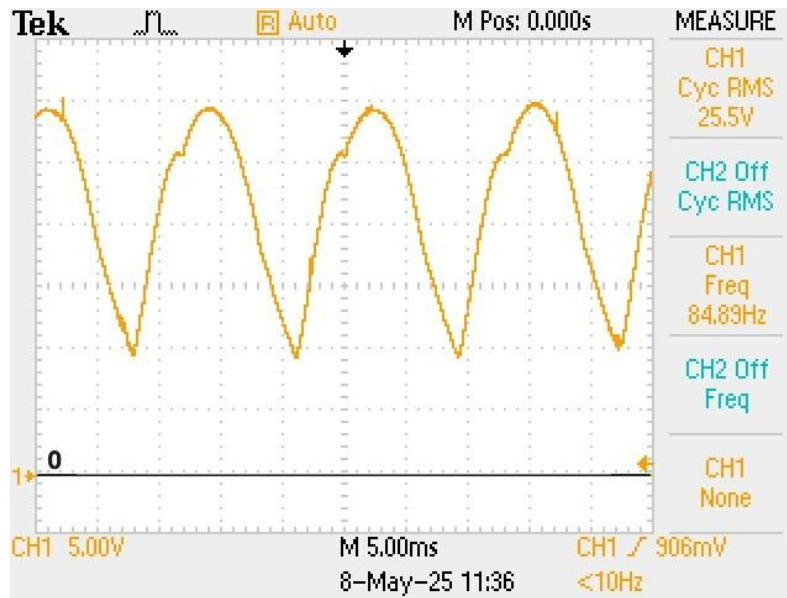


Figura 29. Señal rectificada obtenida. El paso en el eje Y es 5V y en el eje X es 5ms.
Fuente: Elaboración Propia

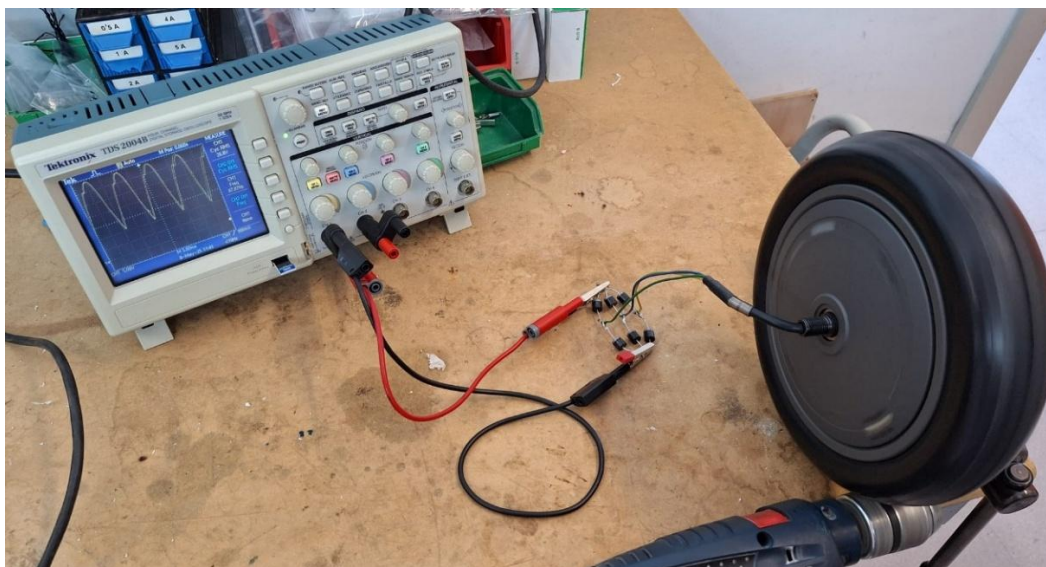


Figura 30. Simulación de viento extremo con el taladro tras la etapa de rectificación. Fuente: Elaboración Propia

6. IMPLEMENTACIÓN

6.1. IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA

La implementación eléctrica del sistema se ha llevado a cabo siguiendo un diseño modular y accesible, con el objetivo de facilitar tanto su montaje como las futuras labores de mantenimiento o modificación. Se han empleado materiales de bajo coste, pero adecuados para soportar las exigencias de un sistema de generación a pequeña escala.

Desde las tres salidas del generador trifásico, se han dispuesto conexiones con cable de cobre estañado de sección $2,5 \text{ mm}^2$ con aislamiento de silicona, elegido por su buena resistencia térmica y mecánica, así como por su flexibilidad, que facilita su manipulación. Estos cables conducen la señal alterna trifásica hacia el puente rectificador, de diodos de 20 A que realiza la conversión de corriente alterna a corriente rectificada.

Las conexiones entre dispositivos se han realizado mediante fichas de empalme rápidas, compatibles con tensiones de hasta 400 V y corrientes de hasta 10 A, garantizando una conexión segura y desmontable. Estas fichas han permitido mantener una buena organización del cableado, al tiempo que facilitan las mediciones de tensión y corriente en distintos puntos del sistema.

Desde la salida del puente rectificador, se ha conectado un regulador de tensión elevador DC-DC (step-up). Este dispositivo ha sido ajustado manualmente mediante su potenciómetro integrado para elevar en torno a un 30% el voltaje de entrada, de forma que se asegure un mínimo de tensión suficiente para que el siguiente componente, el controlador de carga, opere de manera eficiente incluso con vientos de intensidad moderada.

La salida del regulador de tensión DC-DC alimenta un controlador de carga solar, de tipo PWM, que regula la tensión y corriente final para cargar correctamente una batería sellada de 12 V. Este controlador impide la sobrecarga de la batería y desconecta la salida en caso de que la tensión caiga por debajo de un valor seguro, protegiendo así la integridad del sistema.

En conjunto, el circuito está compuesto por cinco etapas claramente definidas y conectadas en serie:

1. Generador trifásico (motor modificado).
2. Puente rectificador.
3. Elevador de voltaje DC-DC.

4. Controlador de carga.
5. Batería de almacenamiento.

Este diseño ha sido validado mediante pruebas en laboratorio, utilizando instrumental como el osciloscopio y el polímetro, para verificar el correcto funcionamiento eléctrico de cada etapa tanto en vacío como en condiciones de carga real.



Figura 31. Caja estanca donde se aloja el puente rectificador, el regulador de tensión DC-DC y el controlador de carga. Fuente: Elaboración Propia

6.2. DISEÑO Y MONTAJE DE LA ESTRUCTURA

El diseño estructural del aerogenerador ha sido concebido para ser robusto, funcional y fácilmente desmontable, permitiendo su transporte, mantenimiento e instalación en distintos entornos. Esta parte del proyecto se ha desarrollado con la colaboración de un herrero, amigo de la familia, que ha aportado tanto su experiencia como parte del material necesario reciclado desde su propio taller.

La estructura se ha fabricado principalmente en acero, debido a su resistencia mecánica, durabilidad frente a la intemperie y facilidad de trabajo mediante soldadura. Se compone de dos piezas principales pensadas para ensamblarse entre sí y facilitar tanto el montaje como el almacenamiento:

1. Base o soporte vertical

Esta primera parte constituye el elemento de apoyo fundamental del aerogenerador. Se ha diseñado para ser estable, resistente y capaz de soportar tanto el peso de la parte superior como las fuerzas derivadas del viento y del giro del rotor.

La base está formada por un disco circular de acero que actúa como plataforma de anclaje al suelo. Esta configuración circular mejora la distribución de cargas y ayuda a evitar el vuelco del conjunto ante ráfagas de viento.

Sobre esta base se ha soldado un tubo de acero de sección cilíndrica, con una longitud de 1,30 metros y paredes de grosor suficiente para garantizar la rigidez del mástil. Este tubo actúa como soporte vertical del sistema, elevando el aerogenerador a una altura adecuada.

En la parte superior del tubo se ha colocado un rodamiento axial de acero, firmemente encajado en el tubo mediante un alojamiento soldado. Este rodamiento permite que la estructura superior (horizontal) pueda girar libremente sobre el eje vertical, facilitando así que el timón oriente automáticamente el aerogenerador en función de la dirección del viento. Este sistema de orientación pasiva es fundamental para la eficiencia del generador y evita tener que usar sistemas electrónicos o motores adicionales.

Además, el mástil vertical ha sido perforado a una altura adecuada para permitir la salida de los cables eléctricos procedentes del generador.

Diseño y Prototipado de un Aerogenerador de Pequeña Escala



Figura 32. Elaboración del soporte vertical. Fuente: Elaboración Propia



Figura 33. Soporte vertical terminado. Fuente: Elaboración Propia



Figura 34. Rodamiento con soporte utilizado. Fuente: Amazon (www.amazon.es)

2. Soporte horizontal con cola y generador

La segunda parte es una estructura horizontal que se inserta en el rodamiento superior del mástil vertical. En esta sección se aloja el generador síncrono, al que se fijan las seis palas del rotor, y también se encuentra el timón o cola que permite al conjunto alinearse con la dirección del viento de forma natural. Esta cola está diseñada de forma que, gracias a la acción del viento, mantenga el rotor siempre orientado de manera óptima para maximizar la generación eléctrica.

Esta parte ha sido diseñada no solo para albergar el generador y los elementos móviles, sino también para integrar el paso interno de los cables eléctricos. Desde el propio generador, los cables discurren por el interior del tubo horizontal, protegidos y ocultos. Al llegar al eje de giro, los conductores atraviesan el interior del rodamiento axial, y continúan su recorrido descendente por el interior del tubo vertical donde finalmente, salen al exterior a través del orificio hecho en el mástil, especialmente diseñado para permitir la salida de los cables sin comprometer la integridad estructural del conjunto ni la movilidad del sistema.

Este diseño interno de cableado permite una disposición ordenada, protegida y segura, minimizando riesgos de exposición a la intemperie, tirones o interferencias mecánicas con el giro del aerogenerador.



Figura 35. Elaboración de la cola. Fuente: Elaboración Propia



Figura 36. Soporte horizontal terminado. Fuente: Elaboración Propia

Diseño y Prototipado de un Aerogenerador de Pequeña Escala



Figura 37. Estructura completa montada, a falta de acoplar el generador con las palas. Fuente: Elaboración Propia

6.3. MONTAJE FINAL

Una vez completadas por separado tanto la estructura mecánica como el sistema eléctrico, se procedió a la integración final del aerogenerador, uniendo todos los componentes en un único conjunto funcional. Este proceso se realizó con especial atención a la disposición y fijación de cada elemento, asegurando su correcto funcionamiento, estabilidad y facilidad de mantenimiento.

La estructura metálica, compuesta por la base vertical y el conjunto superior giratorio, fue ensamblada en su posición definitiva. El generador, con sus seis palas ya acopladas, se fijó firmemente en la parte frontal de la sección horizontal, quedando toda la estructura totalmente integrada.

Posteriormente, se dispusieron y conectaron todos los elementos eléctricos del sistema: desde la salida del generador, los cables trifásicos discurren protegidos por el interior del tubo horizontal, atraviesan el rodamiento y descienden por el mástil vertical. Al salir del tubo vertical, estos cables llegan a una caja estanca, instalada de forma independiente a la estructura, diseñada específicamente para proteger los componentes electrónicos frente a la humedad y el polvo. En su interior se alojan el puente rectificador trifásico, el regulador de tensión DC-DC y el controlador de carga solar. La batería de 12 V, por razones prácticas y de mantenimiento, se encuentra ubicada fuera de esta caja, aunque conectada directamente al sistema.

Durante el montaje se comprobaron cuidadosamente las conexiones eléctricas, midiendo tensiones y continuidad para verificar que no existieran pérdidas ni errores de cableado. Asimismo, se revisó que la rotación del generador y el movimiento del sistema de orientación funcionaran suavemente, sin fricciones indebidas ni interferencias mecánicas.

Finalmente, se realizó una primera prueba de funcionamiento en condiciones reales, colocando el conjunto en una zona abierta y ligeramente elevada. El aerogenerador respondió de manera estable a vientos suaves, logrando iniciar la carga de la batería tras superar la tensión mínima gracias al regulador de voltaje.

La siguiente *Figura 38*, muestra el montaje completo y finalizado del aerogenerador, donde se puede observar la integración estética y funcional de todos los componentes descritos.

Diseño y Prototipado de un Aerogenerador de Pequeña Escala



Figura 38. Implementación completa del aerogenerador. Fuente: Elaboración Propia

7. PRESUPUESTO

El presente apartado recoge el presupuesto estimado para el desarrollo del aerogenerador, incluyendo tanto los materiales eléctricos como la estructura mecánica. Se ha buscado en todo momento optimizar los recursos disponibles, priorizando soluciones funcionales y económicas que no comprometan el rendimiento global del sistema.

Una parte significativa de los componentes empleados han sido adquiridos a través de plataformas de bajo coste como AliExpress, mientras que otros han sido reciclados o proporcionados por un colaborador particular (en este caso, un herrero con taller propio). Esta estrategia ha permitido abaratar sustancialmente los costes y demostrar que es posible desarrollar soluciones energéticas sostenibles a pequeña escala sin necesidad de realizar grandes inversiones.

A continuación, se presenta la tabla desglosada por componentes:

CONCEPTO	DETALLE	COSTE (€)
Generador eléctrico	Motor síncrono de imanes permanentes de patinete eléctrico, 350W	40,00
Palas	6 palas de aerogenerador de 63 cm	35,00
Estructura metálica	Materiales de acero reutilizados	50,00
Rodamiento	Rodamiento con soporte, eje Ø 25mm	8,50
Cable	5 m cable cobre estañado de 2.5 mm ² con recubrimiento de silicona	0,99
Fichas de empalme	Conectores para hasta 10 A y 400 V	3,60
Puente rectificador trifásico	6 diodos 20 A	1,00
Regulador de tensión	Convertidor de refuerzo DC-DC 400W	4,29
Controlador de carga	Controlador de carga solar 10 A	3,50
Batería	Batería de 12 V Plomo Gel	11,50
Caja estanca	Caja estanca IP555, 220x170x85 mm	5,79
Otros materiales y herramientas	Tornillería, soldadura, aparatos de medida, etc.	20,00
COSTE TOTAL		184,17

El presupuesto total del aerogenerador desarrollado es de **184,17 €**.

Este presupuesto demuestra que el desarrollo de un sistema de generación eólica doméstico y funcional puede llevarse a cabo con una inversión modesta, especialmente si se hace un uso eficiente de los recursos disponibles. La reutilización de materiales, la elección de componentes económicos y la colaboración con terceros han sido claves en la viabilidad económica del proyecto.

Además, este enfoque refuerza el carácter didáctico del trabajo, ya que permite demostrar que, con conocimientos técnicos adecuados y planificación, es posible llevar a cabo una solución energética realista, sostenible y replicable sin necesidad de elevados presupuestos.

8. POSIBLES MEJORAS

Una vez finalizado el desarrollo e implementación del prototipo de aerogenerador, y tras su evaluación funcional y experimental, se pueden identificar diversas áreas donde el sistema podría evolucionar o ampliarse para mejorar su rendimiento, eficiencia, robustez y versatilidad. A continuación, se detallan algunas posibles líneas de mejora, basadas tanto en observaciones durante el montaje y pruebas, como en conocimientos técnicos sobre sistemas de generación eólica.

8.1. SUSTITUCIÓN DE PALAS POR OTRAS DE MAYOR TAMAÑO

El aerogenerador actual cuenta con seis palas de 63 cm de longitud, adquiridas en la plataforma AliExpress, priorizando la economía del proyecto. Aunque funcionales, este tipo de palas presenta limitaciones en cuanto a la cantidad de energía eólica que pueden captar, especialmente en vientos de baja o media intensidad.

Instalar palas de mayor longitud supondría un incremento en la superficie de barrido del rotor, lo que permitiría captar más energía cinética del viento. Según la ecuación de potencia eólica mencionada en el *apartado 4.1. PRINCIPIOS FÍSICOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA* :

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

donde **A** (superficie de barrido) es proporcional al cuadrado del radio del rotor, un aumento del largo de las palas tendría un efecto exponencial sobre la potencia teórica capturada [3]. Esto permitiría que el sistema generara mayor par incluso a velocidades bajas de viento, algo especialmente útil en entornos con régimen de viento variable.

No obstante, dicha modificación requeriría revisar el diseño estructural para asegurar la resistencia mecánica ante esfuerzos mayores, así como balancear correctamente el rotor para evitar vibraciones.



Figura 39. Palas de 90 cm. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

8.2. INCLUSIÓN DE UN FILTRO DE CONDENSADORES

Actualmente, la señal eléctrica generada, una vez rectificadora, presenta cierta ondulación residual (rizado), propia de los sistemas de rectificación sin filtrado. Esta componente residual puede afectar al correcto funcionamiento de algunos dispositivos electrónicos sensibles, así como reducir la eficiencia de carga de baterías.

La incorporación de un banco de condensadores (filtro capacitivo) justo a la salida del puente rectificador contribuiría significativamente a suavizar la señal rectificadora, eliminando gran parte del rizado y proporcionando un voltaje más estable al regulador DC-DC [3].

Esta mejora, sencilla de implementar, puede realizarse con condensadores electrolíticos de alta capacidad y voltaje adecuado, dimensionados para soportar la corriente media del sistema.

En la siguiente *Figura 40*, se muestra un posible módulo de filtro a instalar.

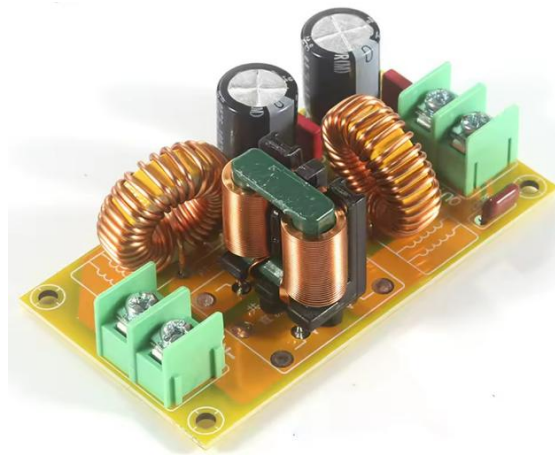


Figura 40. Filtro DC de 10 A. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

8.3. AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA

Durante la fase experimental se ha utilizado una batería de pequeñas dimensiones, suficiente para validar el correcto funcionamiento del sistema, pero insuficiente para un uso real y prolongado.

Para aprovechar completamente la energía generada, especialmente en momentos de alta producción y baja demanda, sería recomendable instalar una batería de mayor capacidad.

Además, una batería más grande permitiría alimentar cargas más exigentes durante más tiempo, aumentando la autonomía del sistema y su utilidad práctica en entornos aislados de la red eléctrica. A continuación, se muestra una batería de camión de 300 Ah que podría ser válida.



Figura 41. Batería de 300 Ah y 12.8 V. Fuente: AliExpress (www.aliexpress.com)

8.4. INCORPORACIÓN DE INVERSOR TRANSFORMADOR

En su configuración actual, el sistema entrega energía en forma de corriente continua, lo que limita su uso a dispositivos que operen directamente con esta forma de energía o que dispongan de sus propios sistemas de conversión. Para ampliar las aplicaciones del sistema eólico y permitir la alimentación de dispositivos comunes de corriente alterna, se propone la incorporación de un inversor transformador DC-AC.

Este inversor tendría una potencia nominal aproximada de 1500 W, y estaría conectado directamente a la batería. Su función sería transformar la energía almacenada (en corriente continua) en una salida de corriente alterna 230V/50Hz, compatible con la mayoría de electrodomésticos y dispositivos eléctricos domésticos o de pequeña industria.

Es importante señalar que esta mejora se plantea en conjunto con la ampliación de la capacidad de la batería (descrita en el *apartado 8.3. AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA BATERÍA*). La batería de mayor tamaño garantizaría una reserva energética suficiente para soportar el consumo de cargas más exigentes durante intervalos prolongados, permitiendo un uso más eficiente y sostenido del inversor sin comprometer la estabilidad del sistema.

Además, se recomienda optar por un inversor de onda senoidal pura, que ofrece una señal de salida idéntica a la red eléctrica convencional, lo cual asegura un funcionamiento más seguro y eficiente de dispositivos sensibles (como cargadores, herramientas electrónicas, electrodomésticos con motores, etc.).



Figura 42. Inversor transformador 12/230 V de 1500W. Fuente: Amazon (www.amazon.es)

8.5. INCLUSIÓN DE UN ARRANCADOR AUTOMÁTICO

Una mejora significativa que podría implementarse en futuras versiones del sistema es el diseño e instalación de un sistema de arranque automático inteligente, que permita optimizar la puesta en marcha del aerogenerador en función de las condiciones reales del viento.

Es importante tener en cuenta que muchos aerogeneradores de pequeña escala, especialmente aquellos que utilizan generadores síncronos con imanes permanentes, requieren inicialmente un impulso de arranque para superar la inercia del rotor y las fuerzas electromagnéticas internas. En fases de viento bajo o intermitente, este impulso puede no ser suficiente para alcanzar una velocidad mínima de generación, lo que implica que el sistema permanece detenido o funcionando de forma ineficiente [2].

El sistema propuesto consistiría en una pequeña unidad de control que, mediante sensores anemométricos, evalúe la velocidad y estabilidad del viento y determine el momento óptimo para iniciar el giro del generador. Una vez alcanzado un umbral mínimo de viento sostenido, el sistema activaría un motor auxiliar o un sistema de asistencia momentáneo (por ejemplo, alimentado desde la propia batería del sistema) que giraría el rotor lo suficiente como para que el viento tome el relevo, y se inicie la generación efectiva de energía.

Esta solución permitiría:

- Reducir los tiempos de inactividad del aerogenerador en condiciones marginales.
- Aumentar la eficiencia global, especialmente en ubicaciones con viento variable.

Además, se podrían explorar soluciones electrónicas de bajo consumo que integren este sistema en el mismo controlador de carga, o bien desarrollar una placa de control dedicada, basada en microcontroladores como Arduino, con capacidad para registrar datos de viento y optimizar el arranque en base a criterios personalizados.

9. CONCLUSIONES

El presente proyecto ha permitido desarrollar un prototipo funcional de aerogenerador doméstico, basado en la adaptación de un motor trifásico síncrono de imanes permanentes. A través de una intervención técnica precisa, se ha modificado la configuración de sus bobinas para mejorar significativamente el rendimiento en condiciones de viento moderado, logrando así que el sistema sea capaz de generar tensiones útiles desde bajas revoluciones.

Desde el punto de vista estructural, se ha diseñado una base mecánica robusta, principalmente en acero, con un montaje dividido en dos partes que facilita su transporte, mantenimiento y orientación al viento. La integración del sistema eléctrico, compuesto por cinco etapas bien definidas (generación, rectificación, regulación, control y almacenamiento) ha sido clave para asegurar una conversión eficiente de la energía eólica.

Durante el proceso se han realizado mediciones y análisis en el laboratorio, que confirman la validez de las decisiones adoptadas. Aunque surgió una incidencia relacionada con el aislamiento de una fase, se resolvió de forma efectiva, sin afectar de manera crítica al comportamiento del sistema. La salida trifásica, pese a su ligera inestabilidad en una de las fases, fue adecuadamente rectificadas, garantizando un voltaje continuo estable.

Este proyecto demuestra que, con un enfoque técnico adecuado y una metodología de trabajo organizada, es posible desarrollar soluciones energéticas sencillas y funcionales utilizando materiales accesibles. A su vez, sienta las bases para futuras mejoras en cuanto a almacenamiento, control de calidad de la energía o aprovechamiento a mayor escala.

El resultado final es un sistema operativo, didáctico y ampliable, que refleja la capacidad de aplicar conocimientos teóricos a un contexto práctico real.

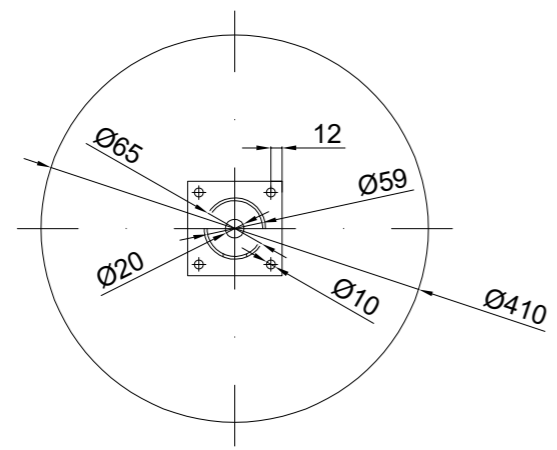
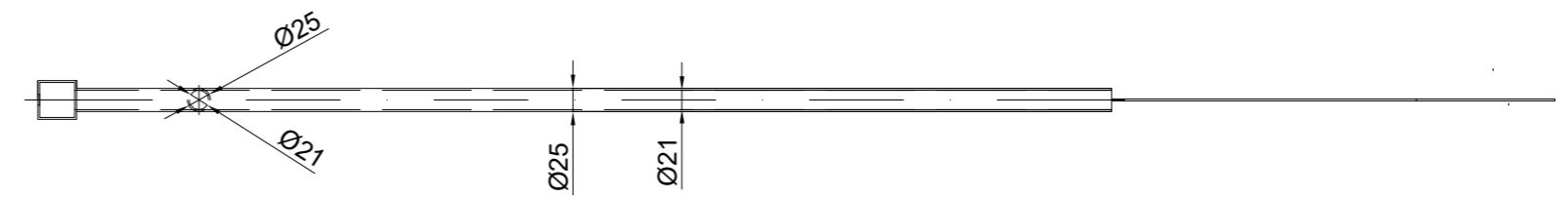
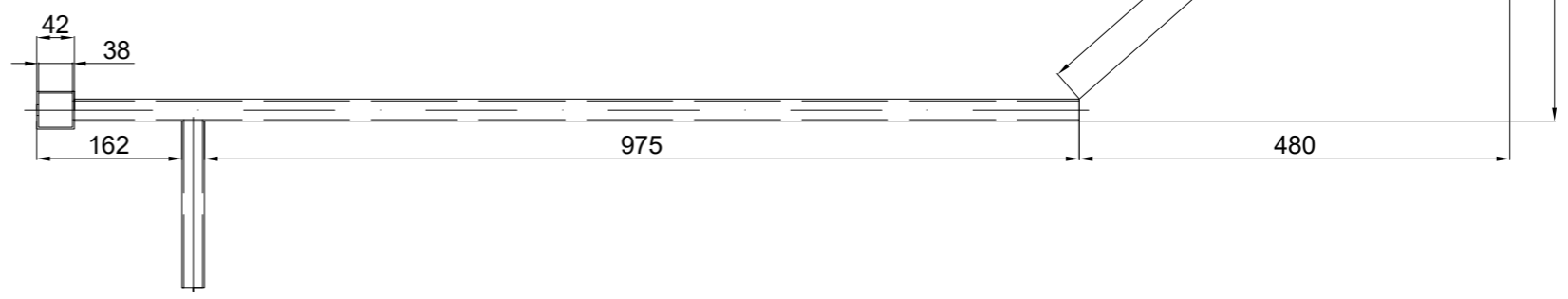
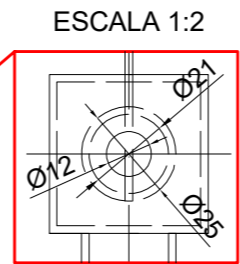
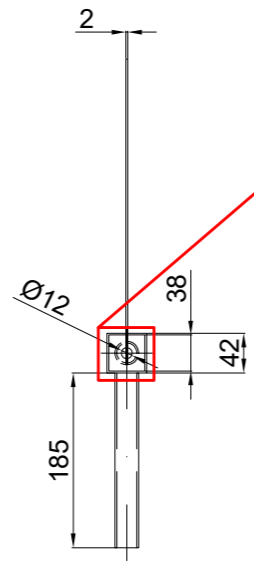
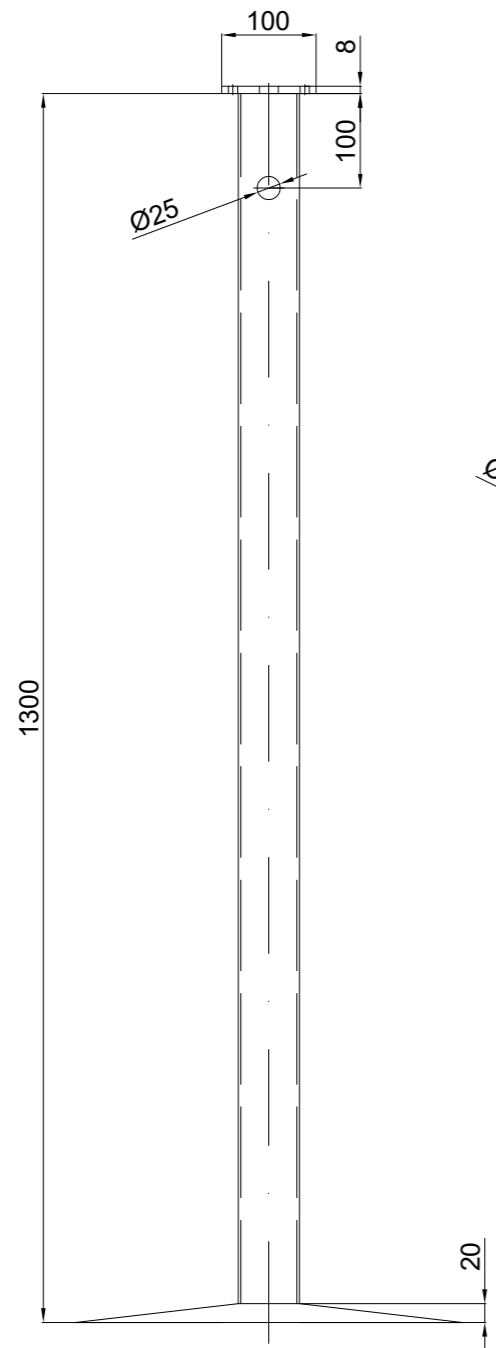
10. REFERENCIAS

- [1] V. López, Energía Eólica, Barcelona (España): Ediciones CEAC, 2004.
- [2] V. López, Ingeniería de la energía eólica, Barcelona (España): Marcombo, 2012.
- [3] Y. L. N. Z. S. K. Bin Wu, Power Conversion and Control of Wind Energy Systems, Hoboken (Estador Unidos): Wiley, 2011.
- [4] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas. Séptima Edición, Madrid (España): Garceta, 2015.
- [5] V. autores, Principios de la Conversión de la energía eólica., Madrid (España): CIEMAT, 2001.

ANEXO I: PLANOS

SOPORTE VERTICAL

SOPORTE HORIZONTAL



 UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	UNIVERSIDAD DE MÁLAGA		
	TÍTULO: ESTRUCTURA DEL AEROGENERADOR		
PROMOTOR: MANUEL CARMONA SANTIAGO	LOCALIZACIÓN: CAMPANILLAS, MÁLAGA, ESPAÑA		
PLANO Nº: 01	PLANO ESTRUCTURA COMPLETA DEL AEROGENERADOR		
AUTOR: MANUEL CARMONA SANTIAGO	ESCALA: 1:8	COTAS EN: mm	
TITULACIÓN: INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES	FECHA: 20 JUNIO 2025		